

1. OBJETIVO

Establecer el paso a paso para realizar la zonificación climática acorde con los productos relacionados con el medio biofísico que se realiza en la Subdirección de Agrología para la cartografía de suelos y otras aplicaciones a la escala de trabajo establecida para los proyectos de la institución.

2. ALCANCE

Este instructivo aplica para la elaboración de la zonificación climática para levantamientos de suelos que realiza la Subdirección de Agrología, inicia con los elementos utilizados en la delimitación de clima continúa con la caracterización de indicadores y finaliza con el perfeccionamiento de los balances hídricos realizados durante todo el proceso de reconocimiento. La ejecución de este instructivo aplica para los servidores públicos de la Subdirección de Agrología que ejecutan labores relacionadas con el grupo interno de trabajo Gestión de Suelos y Aplicaciones Agrológicas.

El Instructivo de zonificación climática para suelos se presenta para uso interno y se encuentra en constante actualización en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

GENERALIDADES

- Cada procedimiento realizado con verificación de campo debe trasladarse al mapa digital de zonificación climática, de manera que sea una capa en constante actualización y mejorada con una base de datos ajustados para el mapa nacional de suelos.
- Utilizar datos climatológicos actualizados de acuerdo con la normal climatológica vigente; consultar y referenciar datos de estaciones meteorológicas de carácter privado que contenga información de mínimo 30 años.
- Revisar bases de datos que contengan información estimada de variables climáticas a través de sensores remotos para la zona de estudio.
- Seguir las sugerencias de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2007) u otra norma más reciente. Revisar que contenga al menos el 70% de los datos de un mes, de lo contrario ese dato mensual no se utiliza. Para evaluar los datos en escala mensual, estos deben cumplir con el mismo criterio de porcentaje y no se incluye un año que no cumpla con el criterio, finalmente, para generar el promedio multianual, para el uso de la serie de datos de una estación, se considera que al faltar más del 30% de los datos la estación se desprecia.
- Antes de desplazarse a campo, los funcionarios y/o contratistas deben socializar con el grupo de reconocedores las características climáticas previstas para la zona de estudio; cada reconocedor debe llevar en su dispositivo la zonificación climática y contrastar los climas con morfología del suelo y vegetación indicadora del clima. Es necesario que identifique espacios amplios con un clima diferente y tomar registros fotográficos del tipo de vegetación y aspecto del paisaje.
- Los funcionarios y/o contratistas responsables deben velar porque dentro del material preparado para salir a campo, se utilice la información reciente y actualizada (fotos, imágenes de satélite, cartografía básica, unidades climáticas, entre otros).

CARACTERÍSTICAS

La zonificación climática se constituye en un elemento importante para la identificación de suelos y la determinación de su potencialidad de uso en la agricultura. Esta información espacial permite definir tipos (conjuntos homogéneos) importantes en la identificación de unidades climáticas. La representación del clima depende del nivel de escala, y esta a su vez, ofrece el detalle que puede ir desde lo macroclimático como en el caso del mapa nacional a escala 1:500.000, como microclimático con elementos representados a la escala 1:10.000 e identificable en el espacio de una finca o una hacienda. La zonificación climática se puede realizar en función de sus elementos básicos tales como la temperatura, el viento, la humedad o la precipitación entre otros, considerándolos individuales o combinados.

La información de clima se constituye en la primera división espacial dada a los tipos de suelos; la segunda división es la cobertura vegetal pues determina algunos procesos de formación de suelos relacionados con la retención o la pérdida de elementos en el suelo.

Las clasificaciones climáticas utilizadas en el mundo se derivan de la combinación escalar de elementos climáticos; entre ellos los más importantes son la temperatura y la precipitación.

De acuerdo con el énfasis que quiera implementarse a la interpretación del clima varios autores han realizado propuestas de como identificar esas características que son determinantes en el análisis que quieren realizar a su objeto de estudio. Se resumen algunas de estas clasificaciones.

- Papadakis, distinguió diez tipos de climas, sus variables de reconocimiento fueron regímenes específicos de temperatura y humedad.
- Köppen utiliza un sistema de cubrimiento mundial que tiene como soporte valores promedio mensuales y anuales de la temperatura y la precipitación, escogidas en función de valores críticos para la vegetación y con un rango ampliado de doce tipos climáticos.
- La clasificación de Caldas se basa en valores altitudinales que determinan los pisos térmicos y estos a su vez se sustentan en valores medios anuales de temperatura. La clasificación de Caldas fue modificada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi para acceder a la posibilidad de identificar la variabilidad de usos agrícolas dentro del clima frío y un aspecto ambiental en la zona nival colombiana. Esta clasificación es importante pues es la única que se realizó para los países intertropicales.
- Martonne utiliza criterios sustentados en análisis geográfico y en climas astronómicos; la clasificación climática contiene un sesgo a identificar el estado de aridez de las tierras; tiene menor aplicación en regiones húmedas.
- Thornthwaite incluye la evapotranspiración potencial, como un elemento interpretativo que proporciona un análisis entre pérdida y ganancia de humedad en relación con la posición latitudinal, lo que muestra mejor aplicabilidad en tierras de latitudes medias y menor representatividad en la zona ecuatorial.
- Lang es una clasificación climática diseñada para identificar el nivel de aridez de la tierra mediante la relación entre la precipitación y la temperatura. Acorde con las investigaciones de Agualimpia y Castro (2017), este indicador presenta poco detalle en las zonas más húmedas de Colombia.

En la figura 1. se presenta un esquema general de elementos climáticos y factores que influyen en las clasificaciones climáticas que se aplican y se destaca las variables que integran los elementos precipitación y temperatura los cuales ofrecen elementos próximos al objeto de estudio que es el suelo.

La temperatura media anual que ocurre a 120 cm. del suelo y bajo las coberturas vegetales, es la variable que indica el calor reflejado del sol sobre la superficie del suelo, esa temperatura o calor irradiado del suelo tiene un efecto equivalente al albedo; mientras que los valores medios de precipitación anual muestran en rangos de humedad la posibilidad de hidratación del material a partir del cual se formaron los suelos.

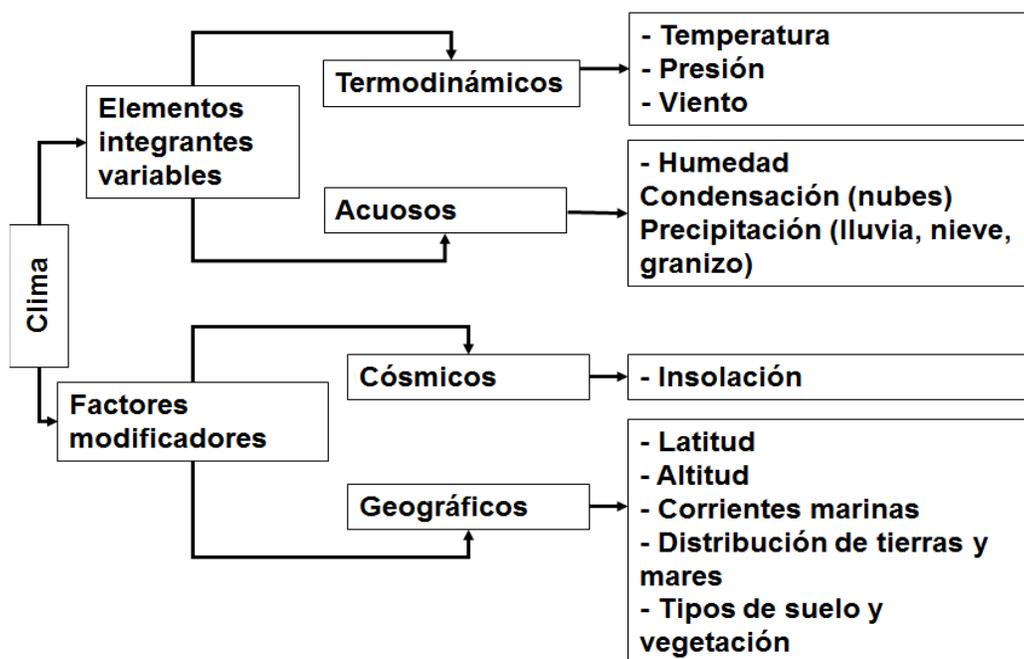


Figura 1. Elementos y factores de clima

En la medida que se integre nueva tecnología e instrumentos a la zonificación climática para suelos, este producto se acercará más a la realidad; en ese sentido, podría afirmarse que la escala de representación del fenómeno es una de las variables que debe justificar el uso de un dato o de un modelo de manera que este sea acorde con el resultado que se quiere obtener.

• TEMPERATURA

La fuente principal para la elaboración del mapa de temperatura son los datos medidos en la red de estaciones meteorológicas instaladas por las entidades encargadas y el uso de un modelo matemático (regresión lineal) entre la temperatura y la altura sobre el nivel del mar, dada la correlación lineal entre estas variables (Agualimpia y Castro, 2015).

Para mejorar su cálculo debe tenerse en cuenta la escala del estudio de suelos que se va a realizar, acorde con las siguientes consideraciones:

- En estudios generales (1:100.000) el uso de un modelo de regresión lineal con la información de todo el país es suficiente.
- En estudios semidetallados (1:50.000 y 1:25.000) debe realizarse un modelo de regresión lineal por cada vertiente, asumiendo la diversidad de factores climáticos y su interacción con el comportamiento de la temperatura en Colombia, para ello, se recomienda el uso de las ecuaciones generadas para quince regiones que presentan similitud en su condición morfoclimática, que se presentan en el cuadro 1 de acuerdo con Castro y Aguallimpia (2017). Así, en la medida que se cuente con mayor cantidad de información o cambio de la normal climatológica, se recomienda ajustar el modelo matemático según las regiones propuestas (Tabla 1).

Tabla 1. Ecuaciones de los modelos de regresión lineal, por zonas morfoclimáticas Fuente: Castro y Aguallimpia (2017)

UNIDAD MORFOCLIMÁTICA	REGIÓN	R ²	REGRESIONES
1	AMAZONIA	0.73	Temp aire = 26.727 + (-0.0050*h)
2	ORINOQUIA	0.83	Temp aire = 27,425 + (-0.0052*h)
3	ORIENTAL – ORIENTAL	0.99	Temp aire = 28,040 + (-0.0058*h)

4	ORIENTAL-OCCIDENTAL	0.98	Temp aire = 29,711 + (-0.0061*h)
5	MACIZO CENTRAL	0.99	Temp aire = 30,136 + (-0.0064*h)
6	VALLE DEL MAGDALENA	0.98	Temp aire = 28,601 + (-0.0057*h)
7	OCCIDENTAL-ORIENTAL	0.98	Temp aire = 30,062 + (-0.0064*h)
8	OCCIDENTAL-OCCIDENTAL	0.78	Temp aire = 27,541 + (-0.0055*h)
9	ANDEN PACIFICO	0.94	Temp aire = 27,015 + (-0.0050*h)
10	CENTRAL-ORIENTAL	0.91	Temp aire = 28,375 + (-0.005*h)
11	GUAJIRA	0.97	Temp aire = 28,338 + (-0.0081*h)
12	SIERRA NEVADA DE STA MARTA	0.99	Temp aire =29,097+(-0,0063*h)
13	CARIBE OCCIDENTAL	0.82	Temp aire =27,542 +(-0,0057*h)
14	CARIBE ORIENTAL	0.83.	Temp aire =27,668 +(-0,0056*h)
15	INSULAR	0.94	Temp aire =30,738 +(-0,0294*h)
Temp. aire es a 120 cm. del suelo y h es altura tomada del DEM (Modelo digital de elevación)			

La Subdirección de Agrología cuenta con una capa raster de temperatura de cubrimiento nacional que puede ajustarse mediante trabajo de verificación realizado en cada levantamiento de suelos y con la utilización de geotermómetros debido a que las regresiones se derivan de datos de estaciones dispersas en el territorio nacional y en la zona de estudio su valor es inferido y proveniente del contexto morfoclimático de gran extensión.

Con las ecuaciones generadas mediante la regresión lineal, se realiza el proceso digital para modelar la temperatura media, para ello se usa el modelo digital de elevación (DEM) de mayor resolución, según disponibilidad del insumo, así, mediante álgebra de mapas se genera el ráster de temperatura media por cada zona morfoclimática, el cual se reclasifica según los rangos de temperatura media. Finalmente, se analizan los pisos térmicos encontrados con los factores climáticos de la zona de estudio.

Para ubicar la zona de estudio en cada unidad morfoclimática se utiliza el vector generado por Castro y Agualimpia (2019) de zonas morfoclimáticas de Colombia.

El gradiente de temperatura del aire corresponde a la diferencia de temperatura que sucede al ascender 100 metros en el relieve y es diferente para cada zona morfoclimática y es un valor opuesto cuando se comparan gradientes en el área continental que en el área insular.

Ejemplo: cálculo del gradiente de temperatura de la zona morfoclimática de amazonia (ecuación 1).

$$Temp. \text{aire} = 26,727 + (-0,005 * h) \quad \text{Ecuación 1}$$

Tabla 2. Cálculo de gradiente térmico por cada 100 m de altitud

Temp. Índice	Coficiente	h (altitud)	Temp. Aire °C
26,727	-0,005	100	26,227
26,727	-0,005	200	25,727
gradiente térmico			0,50

La diferencia de temperaturas de aire resultante del cálculo en 100 metros de altitud determina que, al cambiar de altura en esa proporción, la temperatura se reduce en 0,5°C (Tabla 2).

$$Temp. \text{aire} (24^{\circ}\text{C}) = 26,727 + (-0,005 * 545) \quad \text{Ecuación 1 resuelta}$$

Este resultado permite conocer la cota de altitud para el límite del piso térmico cálido, que ya está determinado en los manuales de suelos en 24°C; es decir, a temperaturas del aire mayores a 24°C se

está en un piso térmico cálido. El resultado en la amazonia el clima cálido comienza a los 545 metros de altitud que puede delimitarse en un DEM.

La primera delineación del piso térmico para levantamiento de suelos está determinada por el gradiente que es diferencial en varias partes del país, corresponde al mapa preliminar de pisos térmicos que será verificada y ajustada en los trabajos de campo con la morfología del suelo y la presencia de especies indicadoras del clima y ajustadas en poscampo con la interpretación de coberturas y cotejamiento con el registro fotográfico. Los ajustes se realizan con el registro de temperatura bajo las coberturas vegetales a 120 cm del suelo con un termómetro y a 50 cm de profundidad en el suelo en la capa interna que no recibe el sol directamente; es importante el registro de la hora, ya que a la 1 pm se presenta el valor más alto de temperatura del suelo en el día.

Para mostrar los avances en la delimitación de pisos térmicos se muestra la clasificación establecida por Francisco José de Caldas y aplicada al trópico americano (Tabla 3). Esta clasificación se basó sólo en la temperatura del aire respecto a su variación altitudinal y no latitudinal. Para ese tiempo Caldas daba un margen de altitud para la zona intertropical de 400 metros de altitud; es decir que en algunos sitios el clima cálido estaba a 600 metros de altitud y en otros más calientes a 1400 metros de altitud.

Tabla 3. Pisos y variaciones altitudinales propuestas por Caldas en 1802 Fuente: Eslava et al., 1986

PISO TÉRMICO	ALTITUD (msnm)	TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	VARIACIÓN DE ALTITUD LOCAL
Cálido	menor de 1000	mayor de 24	Laderas sup. 400 m
Templado	1001 a 2000	17,5 a 24	Laderas sup. y Laderas inf. 500 m
Frío	2001 a 3000	12 a 17,5	Laderas sup. y Laderas inf. 400 m
Páramo bajo	3001 a 3700	7 a 12	
Páramo alto	3701 a 4200	menor de 7	

La temperatura estabilizada del suelo desde el clima frío hacia el páramo alto corresponde a 1,9°C por encima de la temperatura del aire. De esta manera se puede determinar la altitud a la cual se presenta los regímenes térmicos del suelo isomésico, isofrígido. (Castro, Agualimpia y Sánchez, 2017).

Para los demás pisos térmicos se tiene como referente los índices de temperatura del suelo asociados a la temperatura del aire (Tabla 4). Estos valores de correspondencia se encuentran en proceso de revisión y se pueden ajustar durante los trabajos de campo mediante la toma de datos con la ayuda de geotermómetros.

Tabla 4. Valores de temperatura para pisos térmicos y regímenes del suelo. Fuente: IGAC (2014) USDA (2014)

PISO TERMICO	TEMP DEL AIRE °C	TEMPERATURA DEL SUELO °C	REGIMEN TÉRMICO DEL SUELO
Cálido	Mayor de 24	Mayor a 22	Isohipertérmico
Templado	18 - 24	15 a 22	Isotérmico
Frío	12 a 18	8 a 15	Isomésico
Muy frío	8 a 12	0 a 8	Isofrígido
Extr. Frío	8 a 4		
Subnival	0- 4		
Nival	Menor de 0	Menor de 0	Cryico

- **PRECIPITACION TOTAL ANUAL**

La subdirección de Agrología cuenta con un insumo, el raster de precipitación a nivel nacional, el cual puede complementarse con otros datos procedentes de la red meteorológica de otras entidades encargadas, que reporten estaciones dentro de la zona de estudio donde se realizará el levantamiento de suelos.

Esta información puede ajustarse mediante extracción puntual de datos y generación de técnicas de interpolación y agrupación estadística, así como estimar la precipitación con la ayuda de sensores remotos, dentro de la zona de estudio; esto permite mejorar la densidad de datos y la identificación de zonas climáticas solo visibles a escalas detalladas.

Se recomienda interpolar la información a través del método de la distancia ponderada promedio (IDW), el cual tiene la ventaja de ser exacto (Bosque, 1992; Eastman, 1997; citados en Ceballos & López, 2010), es decir, el resultado de la interpolación reproduce en los puntos de muestra, exactamente sus valores originales y se considera importante que conserve el dato, dado que posteriormente se utilizará para el cálculo del balance hídrico por estación. Al respecto autores como Ceballos & López, (2010) manifiestan que a diferencia de las técnicas geoestadísticas de interpolación en IDW no se considera la variabilidad espacial de los datos, por lo que pueden tener sesgos, (Ceballos & López, 2010).

Por su parte, Cifuentes (2016), argumenta que el método IDW permite mantener las superficies de acuerdo con la ubicación de las estaciones y existe menos variabilidad en la predicción, mayor suavizado y presenta mejor ajuste a zonas donde la topografía no es plana, característico de la zona Andina.

Hay dos escalas para determinar el índice de humedad de las tierras la forma más general es mediante la elaboración de isoyetas generadas del raster de precipitación que puede estar ajustado o no con otros datos que se encuentren dentro del área de estudio.

Esta medida de la humedad está dada por los aportes de lluvia y pueden corresponder o no con la humedad de los suelos cuando se pasa de escalas pequeñas a escalas grandes. En esta medida se tiene en cuenta la lámina promedio anual de lluvia sin tener en cuenta la variación o los periodos secos prolongados. El dato de precipitaciones en estos casos es un amplio rango de lámina promedio de agua en milímetros; este rango de lluvias permite caracterizar las tierras de acuerdo con la lámina media de lluvias que ocurren en un año y es representativa a la escala general entre 1:250.000 y 1:100.000.

- **EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (ETP)**

La medida de la evapotranspiración potencial es un reto que hay que afrontar cuando se tienen escalas de mayor detalle (grandes), debido a que en Colombia no hay un cubrimiento homogéneo de estaciones meteorológicas completas que proporcionen todos los datos que se requiere para una escala de aproximación igualmente detallada.

Se muestran aquí dos métodos posibles para realizar las comparaciones cuando se realicen escalas semidetalladas entre 1:50.000 y 1:25.000.

Método de Holdridge

La escala más general y de mayor utilidad ahora que se tiene el raster de temperatura es hallar el índice de humedad por el método de Holdridge.

Se determina la biotemperatura que procede el dato de temperatura del aire y tendrá o no ajustes de acuerdo como lo que plantea Tosi (1976):

- a) Cuando la temperatura del aire está entre 6 y 24°C, se asume que la temperatura media del aire es equivalente a la biotemperatura.
- b) Cuando la temperatura media es mayor de 24°C debe aplicarse la fórmula establecida por Holdridge (1979):

$$Biotemperatura = T_{aire} - \left(3 * \frac{Lat}{100}\right) * ((T_{aire} - 24)2)$$

La temperatura estará expresada en °C

c) Si la temperatura del aire es menor de 6°C se aplica la siguiente fórmula:

$$Biotemperatura = (T_{max}/T_{media\ máxima} - T_{media\ mínima}) * (T_{max}/2)$$

La temperatura estará expresada en °C.

Para el caso colombiano siempre la biotemperatura es igual a la temperatura tomada a 120 cm del suelo y debajo de las coberturas vegetales.

Para hallar la Evapotranspiración potencial por el método de Holdridge se aplica la siguiente fórmula:

$$ETP\ holdrige = biotemperatura \times 58,93 \text{ Ecuación 2}$$

Método Penman – Monteith.

El ráster de ETP también se calcula usando álgebra de mapas, de acuerdo al concepto de Evapotranspiración de referencia o evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), acorde a las recomendaciones de la FAO (1998) en las que se manifiesta que debe realizarse a partir de un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con resistencia superficial de 70 s/m, un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado por unidad de tierra (Allen et al., 2006).

Según la disponibilidad de información, la ET_o se estima a partir del método FAO Penman –Monteith (Monteith & Unsworth, 1990) cuyos datos climáticos son: radiación solar, temperatura, humedad del aire y velocidad del viento, de acuerdo con la ecuación 1.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34 U_2)} \text{ Ecuación 3}$$

Donde:

ET _o	=	evapotranspiración de referencia (mm/día)
R _n	=	Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
R _a	=	Radiación extraterrestre (mm día ⁻¹)
G	=	flujo del calor de suelo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
T	=	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u ₂	=	velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
e _s	=	presión de vapor de saturación (kPa)
e _a	=	presión real de vapor (kPa)
e _s - e _a	=	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	=	Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹)
γ	=	Constante psicométrica (kPa °C ⁻¹)

Cuando los datos climáticos no se encuentren disponibles la ET_o, debe expresarse en términos de las temperaturas de acuerdo con la ecuación 2 de Hargreaves & Samani (1985).

$$ET_o = 0,0023(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \text{ Ecuación 4}$$

Es importante señalar que la temperatura media es el raster que proviene de las regresiones obtenidas en las zonas morfoclimáticas de Colombia (Castro y Agualimpia, 2017) y para los valores máximo y mínimo se elaboran nuevos ráster, esto permite ajustar la zonificación acorde con la variabilidad climática.

Donde la radiación extraterrestre (R_a) está en función de la latitud, la época del año y la hora del día. Los valores de R_a a lo largo del año para diversas latitudes se presentan en el siguiente cuadro:

Radiación solar extraterrestre en mm/día

Latitud	HEMISFERIO NORTE												HEMISFERIO SUR											
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
14	12,2	13,5	14,7	15,6	15,7	15,6	15,6	15,5	15	13,8	12,5	11,8	16,6	16,2	15,3	13,6	12	11,1	11,4	12,8	14,5	15,8	16,2	16,3
12	12,6	13,8	14,9	15,5	15,5	15,3	15,3	15,4	15,1	14,1	12,9	12,2	16,4	16,2	15,4	13,9	12,3	11,5	11,8	13,1	14,7	15,8	16,2	16,3
10	13	14,1	15,1	15,5	15,3	15,1	15,1	15,3	15,1	14,3	13,2	12,7	16,1	16	15,4	14,1	12,7	11,9	12,2	13,4	14,8	15,7	16	16,1
8	13,4	14,4	15,2	15,4	15,1	14,8	14,9	15,2	15,2	14,5	13,6	13,1	15,9	15,9	15,5	14,3	13	12,2	12,5	13,6	14,9	15,7	15,8	15,8
6	13,8	14,6	15,3	15,3	14,9	14,6	14,7	15,1	15,2	14,7	13,9	13,4	15,6	15,8	15,5	14,5	13,3	12,6	12,9	13,9	15	15,6	15,6	15,5
4	14,1	14,9	15,3	15,3	14,7	14,3	14,4	14,9	15,2	14,9	14,2	13,8	15,3	15,6	15,5	14,7	13,6	13	13,2	14,1	15,1	15,5	15,3	15,2
2	14,4	15,1	15,4	15,1	14,4	14	14,1	14,7	15,2	15,1	14,5	14,2	15,1	15,5	15,5	14,9	13,9	13,3	13,5	14,4	15,1	15,4	15,1	14,9
0	14,8	15,3	15,5	15	14,2	13,6	13,8	14,6	15,2	15,3	14,8	14,5	14,8	15,3	15,5	15	14,2	13,6	13,8	14,6	15,2	15,3	14,8	14,5

Fuente: (Allen, et al., 2006)

Según Allen et al. (2006) cuando no se tiene disponibilidad de datos meteorológicos de radiación solar, humedad relativa o velocidad del viento, estos deberían ser estimados usando los procedimientos que se detallan en su guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (FAO, 1998).

Al aplicar la Ecuación 2 en cada nueva zona, se debe verificar la validez de sus resultados comparándolos con estimaciones de la ecuación de FAO Penman - Monteith (Ecuación 1) en estaciones meteorológicas donde se dispone de datos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento.

A partir de la selección de la ecuación de ETP, el procedimiento a seguir corresponde a la elaboración del ráster, mediante algebra de mapas, donde se debe revisar la distribución espacial e interacción de elementos y factores del clima como el viento, el relieve entre otros.

- **BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO (pre-campo)**

Este procedimiento corresponde al balance de agua que se realiza en la etapa pre-campo y mediante él se deriva la primera hipótesis basada en los datos que se encuentran disponibles.

Este balance determina la condición de lluvias de la zona y se utiliza principalmente para la zonificación climática; se emplean los valores medios de la precipitación o también se puede utilizar la probabilidad de ocurrencia del 0,75, que considera una pérdida por percolación o evapotranspiración del 25%.

Este balance sólo considera los aportes de lluvia, los aportes de agua subterránea no se tienen en cuenta. Las demandas siempre están dadas por la evapotranspiración potencial - ETP media.

Las pérdidas en el almacenamiento del suelo se calculan a una tasa proporcional, dependiendo de la fracción de agua almacenada en el suelo. Estas pérdidas se calculan cuando la lluvia es insuficiente para cubrir la demanda de agua (ETP), la cual deja un déficit de agua (ETP-P), (P->precipitación); entonces a partir de la capacidad total de almacenamiento del agua en el suelo y del valor correspondiente al mes anterior (almacenamiento anterior), se determina la fracción de agua almacenada para multiplicarlo por el déficit y así cubrir parte de dicho déficit:

- Pérdida por almacenamiento:

Pérdida por almacenamiento

$$= (ETP - P) * (\text{Almacenamiento anterior} / \text{Almacenamiento total})$$

- Almacenamiento:

$$\text{Almacenamiento} = \text{Almacenamiento anterior} - \text{Pérdida por almacenamiento}$$

- Evapotranspiración real:

$$(ET) = \text{Precipitación} + \text{Pérdida por almacenamiento}$$

$$\text{Déficit} = ETP - ET$$

$$\text{Excesos} = \text{Almacenamiento anterior} + P - ETP - \text{Almacenamiento total}$$

(cuando $P > ETP$ y $\text{ALMACENAMIENTO ANTERIOR} + P > ETP + \text{ALMACENAMIENTO TOTAL}$)

Ejemplo:

Estación 1305503 – Galán (tabla 5)

Precipitación media multianual de noviembre = 97.9 mm

Evapotranspiración potencial = 102.1

Capacidad de almacenamiento del suelo = 150 mm

Almacenamiento mes anterior = 150 mm (octubre)

Pérdida por almacenamiento = $(102.1 - 97.9) \times (150/150) = 4.2$

Almacenamiento = $(150 - 4.2) = 145.8$

Evapotranspiración real = $(97.9 + 4.2) = 102.1$

Déficit (D) = $(102.1 - 102.1) = 0.0$

Exceso (E) = 0 como $P < ETP$

Tabla 5. Hoja de cálculo de balance hídrico climático

1305503	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
Precipitación	22.2	19.6	25.5	116.5	186.9	152.3	127.9	151.5	169.5	154.2	97.9	23.1	1247.1
ETP	112.7	106.2	124.5	113.0	113.8	110.6	121.5	116.6	107.7	105.9	102.1	99.2	1333.8
PER. ALMACE.	43.3	16.5	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	74.0	
Almacenamiento	28.5	12.0	4.1	7.6	80.7	122.4	128.8	150.0	150.0	150.0	145.8	71.8	
ETR	65.5	36.1	33.4	113.0	113.8	110.6	121.5	116.6	107.7	105.9	102.1	97.1	
Déficit	47.2	70.1	91.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	210.5
Exceso	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.7	61.8	48.3	0.0	0.0	123.8

Comprobación del balance hídrico. Para los valores anuales debe cumplir la siguiente relación:

$$P + D = ETP + E$$

$$1247.1 + 210.05 = 1333.8 + 123.8$$

El balance hídrico climático corresponde al análisis de información disponible para cada estación que se encuentre dentro del área de estudio o mayor proximidad de manera que sea el primer referente del comportamiento climático en el que se identifican los periodos de lluvias y temporadas secas, información importante para conocer el estado climático normal que se presentará durante los trabajos de campo.

- **BALANCE HÍDRICO EDÁFICO (Poscampo)**

El contenido de agua en el suelo se estima a partir de la dinámica de las variables edafoclimáticas; no obstante, el balance hídrico podría ser más específico si se involucran datos de infiltración, percolación, consumo de las plantas o escorrentía.

El balance se estima en forma diaria, decadal o mensual, de acuerdo con la información disponible o según la escala del levantamiento de suelos. Este balance considera como parámetros de entrada la ETP, determinada por la ecuación de Penman – Montheith (Ecuación 1) o la ecuación FAO – Penman (Ecuación 2); la precipitación promedio, involucrada como una fracción de la precipitación total utilizada para satisfacer las necesidades de agua del cultivo de acuerdo con las ecuaciones establecidas en Smith (1992) y la capacidad de almacenamiento en el suelo, para la generación de la zonificación climática preliminar se asume un valor hipotético de 100 mm.

Luego de los trabajos de campo y los resultados de laboratorio se realiza un ajuste de la capacidad de almacenamiento acorde con la escala que se trabaje en el producto final.

Los elementos mencionados permiten estimar las pérdidas en el almacenamiento de agua del suelo a una tasa proporcional, dependiendo de la capacidad de almacenamiento de cada tipo de suelo.

Estas pérdidas se calculan cuando la lluvia es insuficiente para cubrir la demanda de agua, según se menciona a continuación:

Si la (Precipitación (P) – Evapotranspiración (ETP)) > 0; Es posible un aporte de agua al suelo, en caso de que éste tenga capacidad de almacenamiento, si no puede contener más agua, el aporte se cuantifica como “escorrentía”. Si (P – ETP) < 0; el suelo perderá este mismo volumen de agua de acuerdo con la reserva acumulada en el período anterior, hasta cuando termine su reserva. Una vez termine el volumen no satisfecho se denominará “déficit”, (IDEAM, 2005).

De esta manera, la dinámica de las variables edafoclimáticas en el balance hídrico se estima de acuerdo con las directrices de la Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, encontrando como fluctúa el almacenamiento de agua en el suelo durante el año; para relacionar su comportamiento con el régimen de humedad que corresponda.

- **CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA SEGÚN CALDAS - LANG Y CALDAS – HOLDRIDGE**

La clasificación establecida por Caldas y aplicada al trópico americano, se basó sólo en la temperatura, pero con respecto a su variación altitudinal y no latitudinal.

En 1962 Schaufelber unificó e implementó el sistema Caldas-Lang, el cual utiliza la variación altitudinal de la temperatura, que indica los pisos térmicos, y la efectividad de la precipitación, que muestra la humedad;

Sin embargo, de acuerdo con los estudios realizados durante levantamiento de suelos se pudo comprobar en campo que la clasificación utilizada a nivel nacional que combina caldas con el índice de Lang no es adecuado para levantamientos pues el índice de Lang sobre valora la humedad de las tierras (Figura 2).

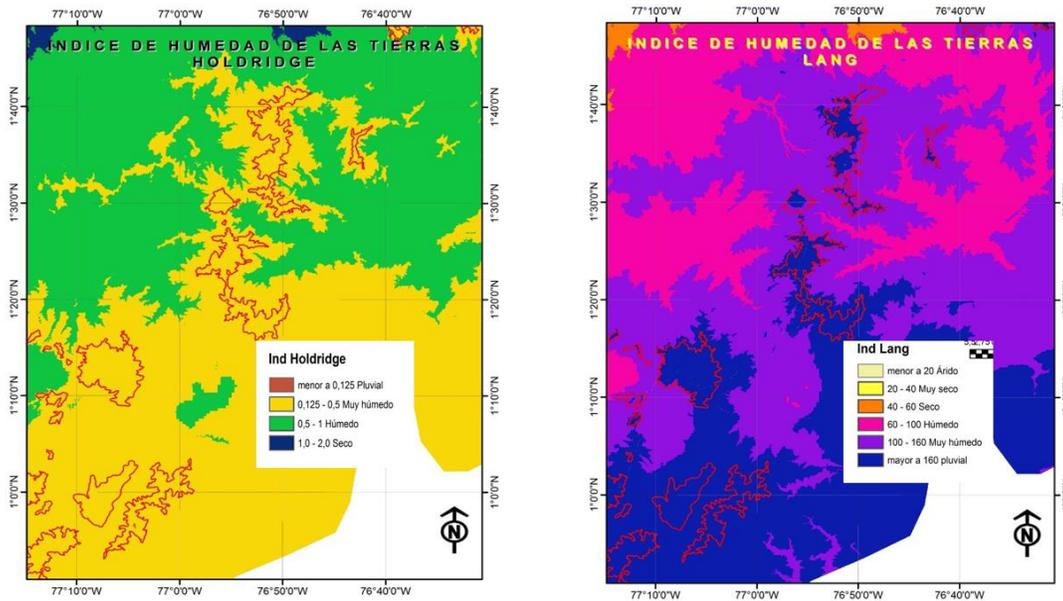


Figura 2. Algunas diferencias espaciales encontradas en la representación de índice de humedad por Lang y Holdridge en complejos de páramos colombianos (Aguilimpia y Castro, 2018).

El primer indicador de humedad fue el de Lang en el cual se relaciona la precipitación con la temperatura media anual (Tabla 6.).

$$\text{Indice de Lang} = \frac{\text{Precip.}}{\text{Temp.}}$$

Donde:

Precip. = Precipitación media anual en mm/año

Temp. = Temperatura media anual en grados centígrados

Tabla 6. Categorías del índice de Lang

Relación Precipitación/Temp. media anual	Zonas
0 – 20	Desiertos
20 – 40	Árida
40 – 60	Húmedas de estepa y sabana
60 – 100	Húmedas de bosques claros
100 – 160	Húmedas de grandes bosques
> 160	Perhúmeda con prados y tundras

Fuente: Lang (1920); IGAC (2014).

En el segundo indicador de humedad de Holdridge se relaciona la evapotranspiración potencial con la precipitación media anual (Tabla 7).

$$\text{Indice de Holdridge} = \frac{\text{Evapotransp.}}{\text{Precip.}}$$

Donde:

Evapotransp. = Evapotranspiración potencial media en mm/año.

Precip. = Precipitación media anual en mm/año.

Tabla 7. Categorías del índice de Holdridge

Relación Evapotranspiración/precipitación	Índice de Humedad
>4	Árido
4 – 2	Muy seco
2 – 1	Seco
1 - 0.5	Húmedo
0.5 - 0.25	Muy húmedo
0.25 - 0.125	Pluvial

Fuente de datos: Holdridge, 1979; IGAC, 2014

De acuerdo con lo anterior el índice de humedad de Holdridge permite distinguir los intervalos de humedad de las tierras variable que es importante en la identificación de las condiciones climáticas y la intensidad en el desarrollo genético de los suelos; mientras que el índice de Lang, muestra mayores subdivisiones en el rango de secado de las tierras y proviene de la identificación de grandes paisajes como lo muestran las categorías originales que en algún tiempo se hicieron semejantes a las de Holdridge para facilitar trabajos de reconocimiento de suelos a la escala pequeña nacional.

La relación Evapotranspiración potencial ETP y precipitación media anual que se muestra en la tabla 8. corresponde al índice de Holdridge utilizado en la Subdirección de Agrología para levantamiento de suelos.

La temperatura corresponde a la temperatura del aire a 120 cm de altitud y bajo las coberturas vegetales, se puede ajustar en campo con el uso de termómetros y un proceso estadístico que permita analizar los registros promedio tomados en el transcurso del día. Durante la etapa de pre-campo se definen los pisos climáticos de Caldas generando franjas térmicas que pueden obtenerse del raster de temperatura realizado con las 15 regresiones de temperatura altitud realizada para cada zona morfoclimática por Aguilimpia y Castro (2017). Durante los trabajos de campo y con la identificación de especies indicadoras del clima, la morfología del suelo, el análisis a nivel de paisaje se ajusta la cota en terreno.

La tabla 8. muestra la unidad climática caracterizada por las variables temperatura que representa los pisos térmicos y el índice de humedad de Holdridge que establece la relación existente en valores promedio anual de la evapotranspiración potencial y le precipitación anual.

La evapotranspiración puede clasificarse por los dos métodos presentados anteriormente y evaluar en campo cuál de ellos tiene mayor representación en la región.

Tabla 8. Variables utilizadas en la clasificación Caldas – Holdridge adaptación IGAC (2018)

UNIDAD CLIMÁTICA			Relación ETP/ precipitación	Temperatura (° C)
CGO	Símbolo	Denominación		
Z	c-A	Cálido, árido	>8	>24
Y	c-SA	Cálido, semiárido	8-4	
X	c-MS	Cálido, muy seco	4-2	
W	c-S	Cálido, seco	2-1	
V	c-H	Cálido, húmedo	1-0.5	
U	c-MH	Cálido, muy húmedo	0.5-0.25	
T	c-P	Cálido, pluvial	0.25-1.25	
S	m-MS	Templado, muy seco	>2	18-24
R	m-S	Templado, seco	2-1	

UNIDAD CLIMÁTICA			Relación ETP/ precipitación	Temperatura (° C)
CGO	Símbolo	Denominación		
Q	m-H	Templado, húmedo	1-0.5	12-18
P	m-MH	Templado, muy húmedo	0.5-0.25	
O	m-P	Templado, pluvial	0.25-1.25	
N	f-MS	Frío, muy seco	2	
M	f-S	Frío, seco	2-1	
L	f-H	Frío, húmedo	1-0.5	8-12
K	f-MH	Frío, muy húmedo	0.5-0.25	
J	f-P	Frío, pluvial	0.25-1.25	
I	mf-S	Muy Frío, seco	2-1	
H	mf-H	Muy Frío, húmedo	1-0.5	
G	mf-MH	Muy Frío, muy húmedo	0.5-0.25	4-8
F	mf-P	Muy Frío, pluvial	0.25-0.125	
E	ef-H	Extremadamente frío, húmedo y muy húmedo	1-0.25	
D	ef-P	Extremadamente frío, pluvial	0.25-0.125	1.5-4
C	s-MH	Subnival, muy húmedo	0.5-0.25	
B	s-P	Subnival, Pluvial	0.25-0.125	
A	N	Nival	-	<1.5

Fuente: IGAC, 2018

3. DESARROLLO

3.1. ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA APLICADA A LEVANTAMIENTOS DE SUELOS

Una vez categorizados los dos elementos meteorológicos principales para la clasificación climática (ETP y precipitación), se realiza una intersección espacial entre las dos capas ráster, cuyo resultado es el Índice de Humedad (Figura 2).

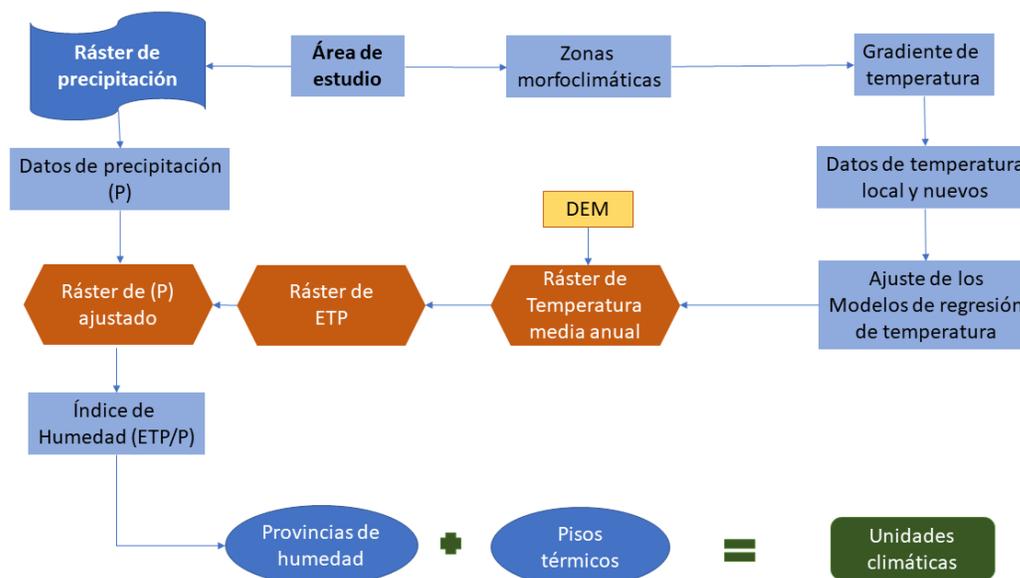


Figura 3. Esquema de los procedimientos digitales para generar la capa de zonificación climática aplicada a suelos.

El índice de Holdridge permite dar categoría a la humedad de la zona y mediante la interpretación del gradiente de temperatura se delimitan los pisos térmicos; al unificar estas dos categorías se obtiene la unidad climática, y corresponde a la metodología de Caldas – Holdridge, modificada por el IGAC (2014) (Tabla 2). Este producto cartográfico corresponde a la zonificación climática aplicada al levantamiento de suelos.

A través de un paso adicional entre la zonificación climática y el régimen de humedad del suelo se elabora un análisis cuantitativo para determinar el balance hídrico del suelo que permite medir la permanencia de humedad en el suelo que está muy relacionada con los periodos lluviosos, aunque se encuentra mediado por las características de retención, almacenamiento y evacuación de agua en el suelo.

El régimen de humedad responde a una dinámica temporal de las variables climáticas cuando se encuentra en la escala general. La variable capacidad de retención de humedad del suelo en la escala detallada debido a mayor discernimiento en las propiedades físicas, por lo cual, se hace necesario estimar este comportamiento a través de un balance hídrico, mediante la inclusión de nuevas variables y procedimientos más detallados que se presenta en el instructivo "Balance hídrico y sus aplicaciones".

3.1.1. Etapa de Campo

La fase de campo permite validar el mapa de zonificación climática de acuerdo con lo observado en suelos y vegetación para ajustar y mejorar la calidad de la información. La calidad de la zonificación climática aplicada a levantamiento de suelos depende de la densidad y distribución de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio y errores inherentes al modelo, es de acuerdo con eso que la representación cartográfica se valida y mejora con la labor que realizan los reconocedores de suelos en el campo.

Así, las variables que determinan si hay correspondencia cartográfica del clima y la realidad morfológica del suelo y la presencia de especies vegetales indicadoras del clima son: temperaturas a 50 cm de profundidad y a 120 cm de la superficie y debajo de la cobertura vegetal, para lo que es necesario anotar la hora de registro e identificar las especies vegetales con el acompañamiento de un especialista en identificar especies vegetales (dendrólogo).

Se recomienda, un muestreo por unidad climática donde se observa la vegetación por posición geomorfológica, densidad, tipo de crecimiento, tamaño de hoja, espinas, entre otros que se consideren propias de la zona. La información debe estar acompañada con su respectivo registro fotográfico de la estructura vegetal, georreferenciada, dato de altitud y hora de la observación, como se presenta en la figura 4.



Figura 4. Toma de datos de temperatura y reconocimiento de los factores climáticos. Fotografía: Carlos Castro y Diana Guzmán, septiembre de 2015.

3.1.2. Etapa Poscampo

La etapa poscampo contempla tres fases relacionados con análisis de los resultados de laboratorio, recolección de información en campo y ajustes cartográficos al mapa de zonificación climática preliminar si es pertinente, como se resume a continuación:

- Se generan balances hídricos a partir de datos del suelo.
- Ajustes y delimitación de enclaves climáticos.
- Armonización y justificación de la relación entre el clima ambiental y el clima del suelo.

De esa manera, los procedimientos a seguir para realizar los ajustes de la capa de zonificación se realizan según el modelo que se presenta en la figura 5.

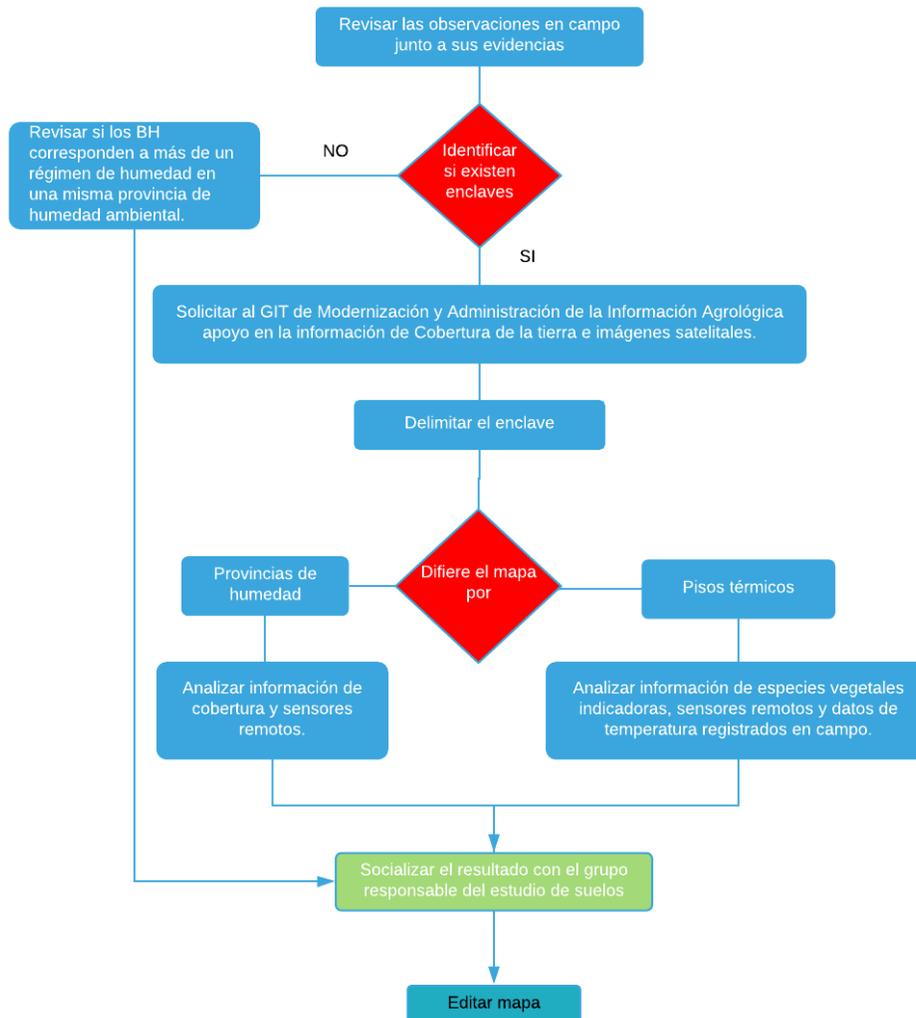


Figura 5. Modelo de ajuste representado por la cartografía del clima con suelo y vegetación.

3.1.2.1. Balances hídricos ajustados

Es necesario analizar los resultados del laboratorio (densidad aparente, contenido de humedad del suelo a capacidad de campo y punto de marchitez, profundidad del horizonte y contenidos fragmentos gruesos de roca mayor al 10%) de las muestras de suelo que servirán para determinar la capacidad de almacenamiento de agua (lámina de agua total) de una unidad de tierra y por lo tanto, revisar si los regímenes de humedad del suelo corresponden a un cambio en la provincia de humedad ambiental o específicamente a la dinámica del suelo para almacenar agua. Así, en una provincia de humedad ambiental, se puede encontrar más de un régimen de humedad del suelo y no se procede al cambio del mapa de zonificación climática.

Para calcular la lámina de agua total (L) hasta una determinada profundidad se procede según las directrices de la Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, que indican que para tal fin se divide el perfil del suelo en horizontes y se calcula la lámina de agua en cada uno (I). De tal manera que L estará dada por la suma de las láminas parciales (I). El valor de L ingresará al balance hídrico en el cual se calculan las pérdidas en el almacenamiento del suelo a una tasa proporcional, dependiendo de la fracción de agua almacenada.

3.1.2.2. Ajustes a características de enclaves

Al revisar los resultados de los balances hídricos y descartar que haya más de un régimen de humedad del suelo en una misma provincia de humedad ambiental, se procede a delimitar los enclaves o zonas que difieren de la capa de zonificación climática elaborada en la etapa de pre-campo. Para la revisión, las evidencias u observaciones de campo se hacen relevantes al correlacionarse con la vegetación (o la actividad humana) y sirven para justificar los cambios en la cartografía de las unidades climáticas. De esta manera, el número de observaciones consistentes con la aplicación del modelo de zonificación climática da una idea de la variación o ajuste a hacer en la capa de clima de acuerdo con el un porcentaje de la información recolectada en campo.

Las observaciones que no correspondan a la información del mapa definen la zona de estudio para analizar los pisos térmicos, las provincias de humedad y los ajustes que tengan lugar en la interpolación de la información digital como se muestra en la Figura 6, observaciones no consistentes marcadas definidas en la leyenda con "x".

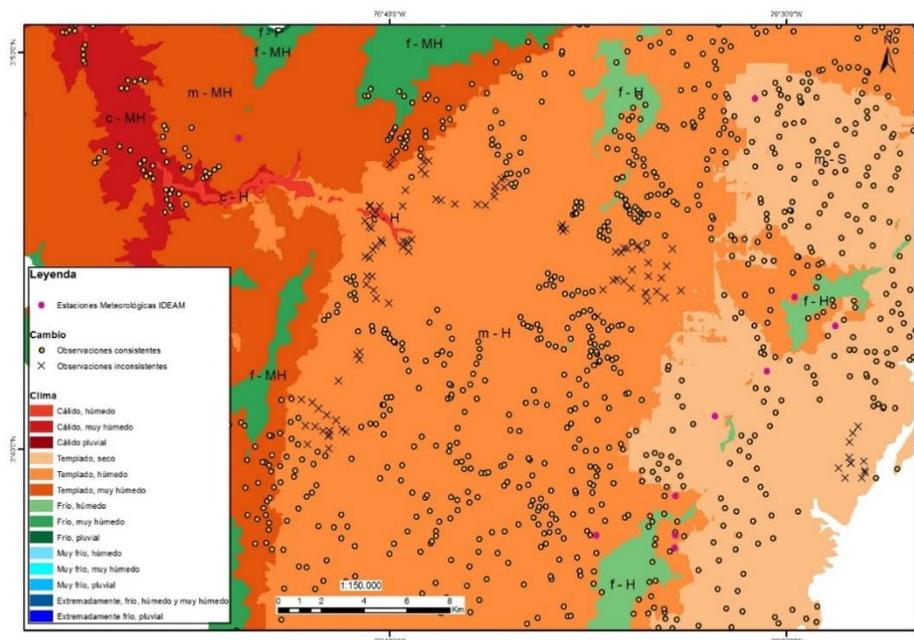


Figura 6. Observaciones tomadas en campo

Con una zona de interés para ajustar la cartografía de zonificación climática, los cambios deben argumentarse con los datos de temperaturas tomados en campo, el tipo de vegetación y suelos encontrados, así, en el ejemplo de la Figura 7 la delimitación de la unidad climática templado seco, se modificó por la cobertura, donde se evidencia herbazal denso de tierra firme correspondientes a provincias de humedad secas, y desde el punto de vista ecosistémico al bosque seco debido a la presencia de especies distintivas; además, si no hay estaciones meteorológicas cercanas, el ajuste se realizaría fundamentado en el cambio de la estructura vegetal.

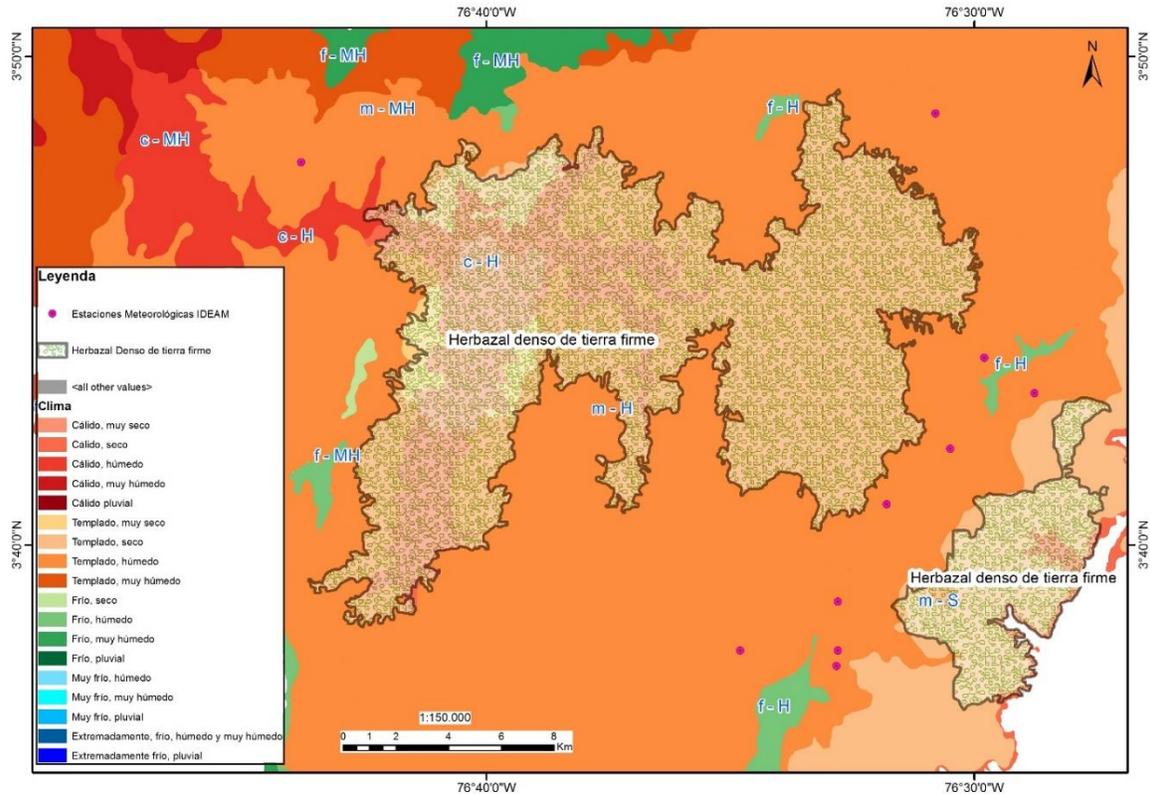


Figura 7. Delimitación de enclave seco, por cobertura vegetal

3.1.2.3. Armonización de clima ambiental

Para ajustes de la cartografía de zonificación climática, se establece una colaboración con el personal del GIT de Modernización y Administración de la Información Agrológica y mediante solicitud con memorando interno o correo electrónico, se intercambia información correspondiente de la zona de estudio referente a cartografía Cobertura de la tierra, provisión de imágenes de satélite y el concepto del profesional experto en cobertura vegetal.

Un ejemplo de ello se presenta en la figura 8 que muestra información de cobertura de la tierra sobre la imagen de satélite, las áreas en tonos azules en la imagen de satélite corresponden a coberturas de herbazales denso, vegetación que se desarrolla en áreas que no están sujetas a períodos de inundaciones, las cuales pueden presentar o no elementos arbóreos y/o arbustivos dispersos (CLCC. 2010). Los tonos marrones a naranja describen vegetación abundante de tipo arbóreo que se asocia a mayores condiciones de humedad y a partir de la delimitación de la cobertura se podrá modificar la capa de zonificación climática (Figura 9).

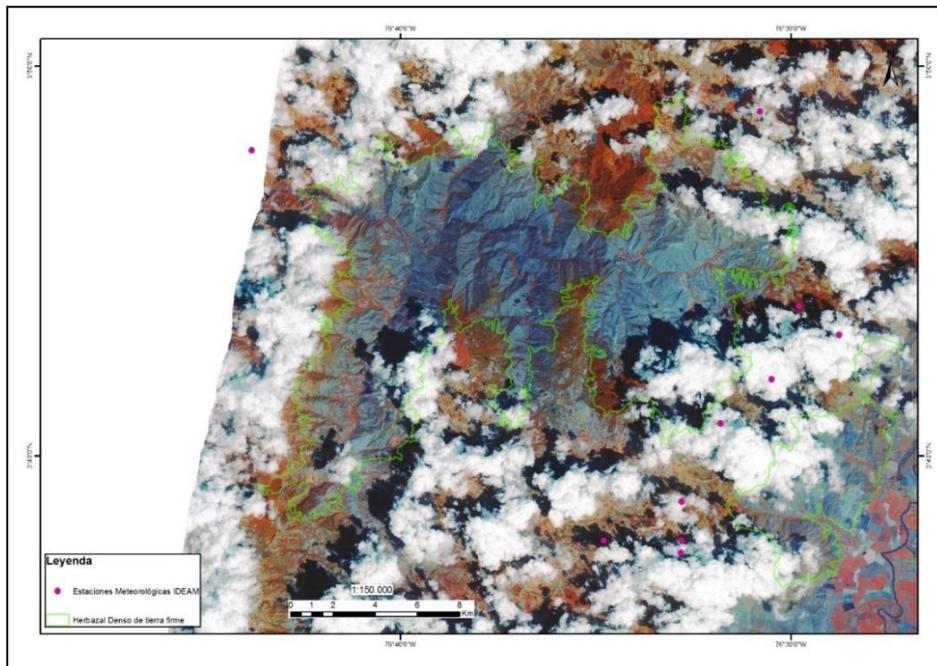


Figura 8. Ejemplo de identificación de cobertura vegetal, mediante imágenes satelitales



Figura 9. Capa de zonificación climática, modificada

Finalmente, es necesario compartir los resultados con los profesionales que realizan el control de calidad en campo para presentar las evidencias de todos los cambios que permitieron el ajuste de la cartografía, compartir las experiencias con el grupo de reconocedores de suelos y editar la salida final del mapa correspondiente.

4. CONTROL DE CAMBIOS

FECHA	CAMBIO	VERSIÓN
11/05/2021	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Se adopta como versión 1 debido a cambios en la Plataforma Estratégica (actualización del mapa de procesos), nuevos lineamientos frente a la generación, actualización y derogación de documentos del SGI tales como: cambios de tipos documentales y nueva codificación por procesos. Emisión Inicial Oficial. ◦ Se unificaron los documentos "Zonificación climática", código I40100-05/14.V1, versión 1 y "zonificación climática aplicada a levantamiento de suelos", código M40100-04/18.V1, versión 1. ◦ Se crea el instructivo "Zonificación Climática para Levantamiento de Suelos", IN-GAG-PC05-13, versión 1. ◦ Se deroga totalmente las circulares 139 del 22 de mayo de 2018 y 596 del 20 de octubre de 2014. ◦ Se asocia al procedimiento "Levantamiento de Suelos a diferentes escalas", código PC-GAG-05, versión 1. ◦ Se elimina el anexo y se incluye dentro del documento. 	1

Elaboró y/o Actualizó	Revisó Técnicamente	Revisó Metodológicamente	Aprobó
<p>Nombre: Carlos Enrique Castro Méndez</p> <p>Cargo: Profesional Especializado Subdirección de Agrología.</p> <p>Nombre: Maria Paula Rojas Rueda</p> <p>Cargo: Contratista Subdirección de Agrología.</p>	<p>Nombre: Janeth González Nivia</p> <p>Cargo: Coordinadora del GIT Gestión de Suelos y Aplicaciones Agrológicas</p>	<p>Nombre: Marcela Yolanda Puentes Castrillón</p> <p>Cargo: Profesional Especializado Oficina Asesora de Planeación.</p>	<p>Nombre: Napoleón Ordoñez Delgado</p> <p>Cargo: Subdirector de Agrología</p>



**ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA PARA LEVANTAMIENTO DE
SUELOS**

Código: IN-GAG-PC05-13

Versión: 1

**Vigente desde:
11/05/2021**